

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
29. Januar 2004 (29.01.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/010550 A1(51) Internationale Patentklassifikation⁷: H01S 3/11,
3/0941, 3/10, 3/102

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002359

(22) Internationales Anmeldedatum:
10. Juli 2003 (10.07.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

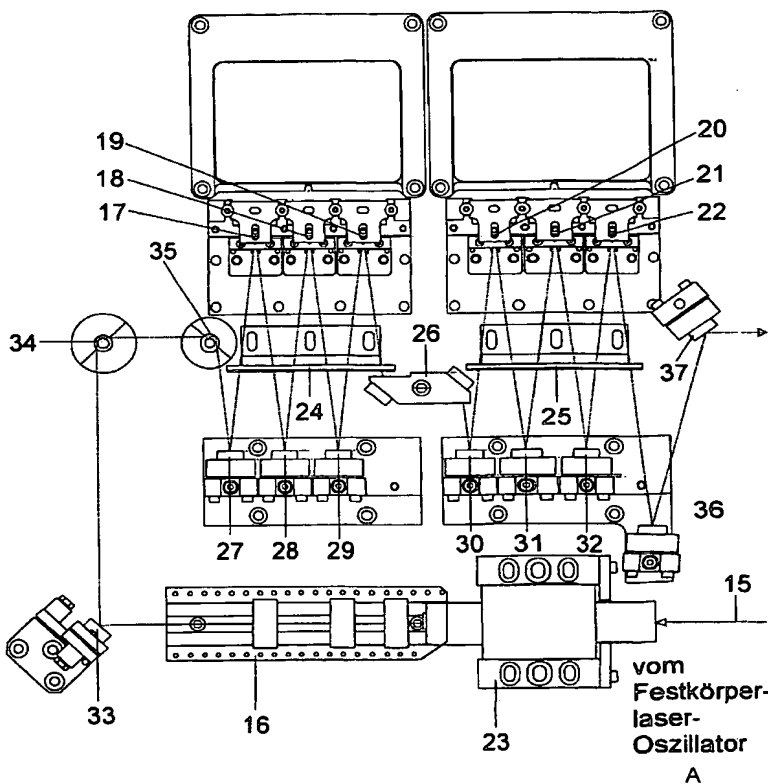
(30) Angaben zur Priorität:
102 32 124.8 12. Juli 2002 (12.07.2002) DE(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): JENOPTIK LASER, OPTIK, SYSTEME GMBH
[DE/DE]; Göschwitzer Strasse 25, 07745 Jena (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): HOLLEMANN, Gün-
ter [DE/DE]; Wieselweg 15, 07749 Jena (DE). LEITNER,
Martin [DE/DE]; Arvid-Harnack-Strasse 5, 07743 Jena
(DE). SYMANOWSKI, Jan [DE/DE]; Am Heiligenberg
16, 07743 Jena (DE).(74) Anwälte: BERTRAM, Helmut usw.; Oehmke & Kolle-
gen, Neugasse 13, 07743 Jena (DE).(81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR,
CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH,
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,
MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: PULSE LASER ARRANGEMENT AND METHOD FOR SETTING PULSE LENGTH FOR LASER PULSES

(54) Bezeichnung: IMPULSLASERANORDNUNG UND VERFAHREN ZUR IMPULSLÄNGENEINSTELLUNG BEI LASER-
IMPULSEN

A ... FROM THE SOLID BODY LASER OSCILLATOR

(57) Abstract: The invention relates to a pulse laser arrangement and a method for setting pulse length for laser pulses with the aim of changing the pulse length over a wide range essentially independently of the laser output power, in particular to counteract a reduction in the power and a negative change to the beam parameters on a pulse lengthening due to a variation in the oscillator power. A multi-stage laser amplifier is arranged in series after a diode-pumped, Q-switching solid body laser oscillator with variable oscillator power, for the production of oscillator pulses, whereby each stage (17-22) has an amplifying medium with a low-level signal amplification of more than 10, whereby the total low-level signal amplification due to all the amplifying media is more than 1000. The laser pulse arrangement and the method are suitable for industrial or medicinal purposes, whereby there is a requirement for pulse lengths in the range of several 100 ns up to several μ s with pulse repetition rates between 10 kHz and 200 kHz.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Bei einer Impulslaseranordnung und einem Verfahren zur Impulslängeneinstellung bei Laserimpulsen besteht die Aufgabe, die Pulslänge über einen weiten Bereich weitgehend unabhängig von der Laserausgangsleistung zu ändern, insbesondere einer Leistungsreduzierung entgegenzuwirken und eine sich negativ auswirkende Veränderung der Strahlparameter bei der Pulsverlängerung über eine Variation der Oszillatorleistung zu vermeiden. Einem diodengepumpten, gütegeschalteten Festkörperlaseroszillator mit variabler Oszillatorleistung zur Bereitstellung von Oszillatorimpulsen wird ein mehrstufiger Laserverstärker nachgeschaltet, bei dem in jeder Stufe (17-22) ein verstärkendes Medium mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 vorgesehen ist, wobei die durch alle verstärkenden Medien hervorgerufene Gesamtkleinsignalverstärkung mehr als 1000 beträgt. Die Impulslaseranordnung und das Verfahren sind für industrielle oder medizinische Zwecke verwendbar, bei denen die Forderung nach Pulslängen im Bereich einiger 100 ns bis hin zu einigen µs bei Pulswiederholraten zwischen 10 kHz und 200 kHz besteht.

Impulslaseranordnung und Verfahren zur
Impulslängeneinstellung bei Laserimpulsen

- Die Erfindung betrifft die Einstellung der Impulslänge bei
5 diodengepumpten, gütegeschalteten Festkörperlaser-
Oszillatoren mit variierbarer Oszillatorleistung,
insbesondere Grundmodelasern hoher Ausgangsleistung von
mehr als 10 W.
- 10 Für viele industrielle oder medizinische Anwendungen ist
es vorteilhaft, die Pulslängen sowie die Pulsenergie
eines Lasers zu variieren, um dadurch dessen Wirkung
gezielt steuern zu können. Pulslängen im Bereich einiger
100 ns bis hin zu einigen μ s bei Pulswiederholraten
15 zwischen 10 kHz und 200 kHz sind dabei von besonderem
Interesse. Bevorzugtes Anwendungsgebiet in der Medizin ist
derzeit die Augenheilkunde und in der Industrie das
Laservereinzeln von Chips auf Silizium- oder GaAs-Wafern.
Aber auch in der Materialbearbeitung, wie zum Beispiel bei
20 der Keramik- oder Diamantbearbeitung, beim Laserhonen und
Laserbohren besteht ein dringender Bedarf, wobei hier
allerdings besonders kurze Impulse unterhalb 10 ns
gefordert sind.
- 25 In großer Anzahl vorhandene Ausführungsformen von
kontinuierlich gepumpten, akustooptisch gütegeschalteten
Festkörperlaser-Oszillatoren, die vor allem lampengepumpte
oder transversal diodengepumpte Nd:YAG-Stablasern umfassen,
erreichen typische Pulslängen von 50 ns bis 200 ns, wobei
30 die großen Pulslängen bei geringer Pumpleistung und nur
bei einer hohen Pulswiederholrate, die kurzen Pulslängen
dagegen nur bei einer geringen Pulswiederholrate
erreichbar sind. Längere Pulsdauern als 200 ns lassen sich
mit diesen Ausführungen aufgrund der schwierigen

Erreichbarkeit des transversalen Grundmodebetriebs und einer niedrigen Pulsstabilität nicht mehr technisch vernünftig herstellen. Darüber hinaus lassen sich solche Laser auch nur in einem sehr eingeschränkten
5 Parameterfenster betreiben.

Zwar werden mit endgepumpten Nd:YVO₄-Laseroszillatoren besonders hohe Durchschnittsleistungen bei Repetitionsraten von 100 kHz erreicht, doch ist auch hier
10 bei gegebener Resonatorkonfiguration (L, V, R, P_{th}) eine Variation der Pulslänge nur durch eine Änderung der Pumpleistung P_p möglich und führt aufgrund der Korrelation zwischen Pulslänge und Pulsenergie zu einer drastischen Reduktion der Ausgangsleistung bei einer Vergrößerung der
15 Pulslänge. Der Zusammenhang ist bei [R. Iffländer: Solid-State Lasers for Materials Processing, Springer Series in Optical Sciences, Springer Verlag, Berlin (2001)] beschrieben, wonach die Pulslänge aus den Parametern Pumpleistung P_p, der Pumpleistung bei der Laserschwelle
20 P_{th}, Auskoppelgrad R, Verlustfaktor V und Resonatorlänge L nach der Formel

$$\tau = \frac{L}{c} \cdot \frac{P_p}{-\ln(V\sqrt{R})[P_p - P_{th} - P_{th} \ln(P_p / P_{th})]}$$

25 berechnet werden kann.

Darüber hinaus führt die Änderung der resonatorinternen Leistung durch die Variation der Pumpstrahlungsleistung im Allgemeinen zu einer Änderung der thermischen Linse des
30 Laserkristalls, so dass sich auch die Strahlparameter des ausgekoppelten Strahls ändern. Dieser Effekt ist für viele Anwendungen störend, insbesondere führt eine anisotrop

wirkende thermische Linse zu einer Asymmetrie des Strahlprofils.

5 Auch eine Änderung der Repetitionsrate des Lasers ist unmittelbar mit einer Veränderung der Pulsdauer und der Ausgangsleistung verbunden. Dabei nimmt sowohl die Pulsdauer als auch die mittlere Leistung mit geringerer Repetitionsrate ab.

10 Ferner ist es aus der DE 199 58 566 A1 und der DE 199 27 918 A1 bekannt, bei diodengepumpten Lasern mit resonatorinterner Frequenzverdopplung für medizinische Anwendungen, eine Pulslängenvariation durch eine Steuerung der Gütemodulation zu erreichen.

15 Von Nachteil ist, dass zusätzliche Oszillatorverluste infolge der Störung des Impulsaufbaus zu einer schlechten Effektivität führen und dass in der starken nichtlinearen Dynamik durch den exponentiellen Impulsanstieg eine steuerungstechnisch aufwendige Lösung begründet ist.

20 Aufgabe der Erfindung ist es, die Pulslänge über einen weiten Bereich weitgehend unabhängig von der Laserausgangsleistung zu ändern, insbesondere einer Leistungsreduzierung entgegenzuwirken und eine sich
25 negativ auswirkende Veränderung der Strahlparameter bei der Pulsverlängerung über eine Variation der Oszillatorleistung zu vermeiden.

30 Gemäß der Erfindung wird die Aufgabe durch eine Impulslaseranordnung zur Erzeugung von Laserimpulsen mit einstellbarer Impulslänge, bei der ein diodengepumpter, gütegeschalteter Festkörperlaser-Oszillator mit variierbarer Oszillatorleistung zur Bereitstellung von Oszillatorimpulsen vorgesehen ist, dadurch gelöst, dass

dem gütegeschalteten Festkörperlaser-Oszillator ein mehrstufiger Laserverstärker nachgeschaltet ist, bei dem in jeder Stufe ein verstärkendes Medium mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 vorgesehen ist, wobei die durch alle verstärkenden Medien hervorgerufene Gesamtkleinsignalverstärkung mehr als 1000 beträgt.

Durch die hohe Kleinsignalverstärkung, die mehr als 1000 betragen sollte, findet eine Impulsformung und Impulsverbreiterung infolge der sich ändernden Inversionsdichte statt, bei der keine lineare Intensitätsüberhöhung über den gesamten Oszillatorimpuls eintritt, sondern die Vorderflanke des Oszillatorimpulses wird durch die hier noch größere Inversion sehr viel mehr verstärkt als die Rückflanke, bei der die Inversion bereits herabgesetzt ist. In der Folge ist die Impulsverstärkung mit einer zeitlichen Vorversetzung der Anstiegsflanke des Laserimpulses gegenüber der des Oszillatorimpulses verbunden.

Mit der Erfindung kann die Pulslänge aufgrund der Variation der Oszillatorleistung durch eine Änderung der Pumpstrahlungsleistung über den Diodenstrom in einem extrem weiten Bereich (200 ns - 2000 ns) eingestellt werden, während die Laserausgangsleistung weitgehend konstant bleibt. In diesem Sinne führt der hohe Grad der Kleinsignalverstärkung zu der Entkopplung der Variation der Oszillatorleistung von der Laserausgangsleistung.

Von Vorteil ist es, wenn die zum Kehrwert der Kleinsignalverstärkung proportionale Querschnittsfläche des verstärkenden Mediums minimiert wird. Insbesondere sollte der Modenquerschnitt der modenangepassten Strahlen der Pumpstrahlung und der zu verstärkenden Laserstrahlung

in dieser Querschnittsfläche in jedem verstärkenden Medium unterhalb von $0,5 \text{ mm}^2$ liegen.

5 In vorteilhafter Ausgestaltung kann der Festkörperlaser-Oszillator als aktives Medium einen anisotropen Laserkristall enthalten, der von einem asymmetrischen Pumpstrahl gepumpt ist, dessen Pumpstrahlquerschnitt senkrecht zueinander unterschiedliche Ausdehnungen aufweist und der von einem an diese Asymmetrie angepassten
10 Laserstrahlquerschnitt mit einem Achsverhältnis in senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen größer 1:1 und kleiner 1:3 durchsetzt ist.

Das kann dadurch erreicht werden, dass von den
15 kristallographischen Achsen des anisotropen Laserkristalls diejenige Achse, in deren Richtung der höchste Wert der Kristallbruchgrenze vorliegt, entlang des größten, in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnitts gelegten Temperaturgradienten
20 ausgerichtet ist. Der anisotrope Laserkristall, der einen von dem Pumpstrahl durchsetzten Kristallquerschnitt mit paarweise parallel gegenüberliegenden Kristallkanten von unterschiedlicher Kantenlänge enthält, weist seinen größten Wärmeausbreitungskoeffizienten in Richtung der
25 geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes und parallel zur Kristallkante mit der geringeren Kantenlänge auf.

Die obenstehende Aufgabe wird ferner erfindungsgemäß durch
30 ein Verfahren zur Impulslängeneinstellung bei Laserimpulsen durch Variation der Leistung eines diodengepumpten, gütegeschalteten Festkörperlaser-Oszillator zur Bereitstellung von Oszillatorimpulsen gelöst, indem die Oszillatorimpulse einem mehrstufigen

Laserverstärker zugeführt und in jeder Stufe mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10, mindestens jedoch mit einer Gesamtkleinsignalverstärkung von mehr als 1000 verstärkt werden.

5

Die Erfindung liefert somit ein universelles Werkzeug zur Gestaltung der Pulslänge für eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen aus Industrie und Medizin, indem besonders kurze aber auch besonders lange Impulse mit
10 einer einheitlichen Pulsform sowie hohen Pulsspitzenleistungen und einer konstant hohen Pulswiederholrate zur Verfügung gestellt werden. Hervorzuheben ist insbesondere die Pulsstabilität bei langen Impulsen.

15

Die Erfindung soll nachstehend anhand der schematischen Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen:

20 Fig. 1 den Aufbau eines gütegeschalteten Festkörperlaser-Oszillators

Fig. 2 die Achsenorientierung im anisotropen Laserkristall

25 Fig. 3 einen Laserverstärker, der dem gütegeschalteten Festkörperlaser-Oszillator nachgeschaltet ist

30 Fig. 4, 4a mit Hilfe der erfindungsgemäßen Anordnung, bestehend aus einem Oszillator geringer Leistung und einem Verstärker mit sehr hoher Kleinsignalverstärkung, erzeugte unterschiedliche Pulsformen an den Ausgängen

des Festkörperlaser-Oszillators und des
Laserverstärkers

5 Fig. 5 ein Diagramm zum Verhalten der Pulslänge am
Ausgang des Festkörperlaser-Oszillators und am
Ausgang des Laserverstärkers in Abhängigkeit
vom Diodenstrom der Pumpstrahlquelle für den
Festkörperlaser-Oszillator und damit von der
Oszillatorleistung

10

Fig. 6 ein Diagramm zum Verhalten der
Laserausgangsleistung in Abhängigkeit vom
Diodenstrom der Pumpstrahlquelle für den
Festkörperlaser-Oszillator und damit von der
15 Oszillatorleistung

Ein in Fig. 1 dargestellter und für die Erfindung
besonders geeigneter gütegeschalteter Festkörperlaser-
Oszillator enthält als Laserkristall einen Nd:YVO₄-
20 Kristall 1, der direkt mittels eines
Hochleistungsdiolenlasers 2 in Form einer
Diodenlaserzeile, eines Diodenlaserbarrens oder einer
Anordnung davon gepumpt ist. Eine dafür ausgebildete, aus
zwei Zylinderlinsen 3, 4 mit senkrecht zueinander
25 stehenden Zylinderachsen bestehende Abbildungsoptik
transformiert die kollimierte Pumplichtstrahlung (808 nm)
zur räumlichen Überlappung mit der Lasermode. Dabei wird
das ursprüngliche Fokus-Halbachsen-Verhältnis zwischen der
Fast-axis und der Slow-axis von etwa 1:20 in ein
30 asymmetrisches Achsverhältnis von 1:2,3 umgewandelt und
mit diesem asymmetrischen Strahlquerschnitt auf den
Nd:YVO₄-Kristall 1 abgebildet. Im Gegensatz zu einer
Strahlungsübertragung mittels Lichtleitfasern führt die
vorgesehene direkte Freistrahübertragung der

Pumpstrahlung zu einem technologisch einfachen, mit geringeren Verlusten behafteten und belastungsfähigeren Aufbau.

5 Der anisotrope Nd:YVO₄-Kristall 1, der an seiner, der Diodenlaserzeile 2 zugewandten Strahleintrittsfläche 5 mit einer Antireflexbeschichtung für die Pumpwellenlänge von 808 nm und einem hochreflektierenden Schichtsystem für die Laserwellenlänge von 1064 nm versehen ist, ist gemäß Fig.
10 2 derart zum Pumpstrahl 6 orientiert, dass seine kristallographische c-Achse in Richtung der größeren Ausdehnung (parallel zur Slow-axis) und die kristallographische a-Achse, in deren Richtung der höchste Wert der Kristallbruchgrenze und des
15 Wärmeausbreitungskoeffizienten vorliegt, in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes (parallel zur Fast-axis) gerichtet sind.

Es hat sich gezeigt, dass eine erhebliche Erhöhung der
20 Kristallfestigkeit gegenüber einer thermischen Beanspruchung durch eine Erniedrigung der Kristallhöhe in Richtung der a-Achse und einer damit verbundenen Vergrößerung des Temperaturgradienten erreicht werden kann. Das bedeutet, dass der Laserkristall 1 bei
25 wesentlich höheren Pumpleistungen und Pumpleistungsdichten betrieben werden kann als bei bisher bekannten Anordnungen.

Dieser Forderung wird die Ausführung gemäß Fig. 2 gerecht,
30 indem der Laserkristall einen von dem Pumpstrahl 6 durchsetzten Kristallquerschnitt mit paarweise parallel gegenüberliegenden Kristallkanten 7, 8, 9 und 10 von unterschiedlicher Kantenlänge aufweist, wobei die Kristallkanten 7 und 8 gegenüber den Kristallkanten 9 und

10 eine geringere Kantenlänge aufweisen und in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes verlaufen.

5 Die durch die Reduzierung der Kristallabmessungen in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes hervorgerufene Asymmetrie des Wärmeffusses und die daraus resultierende Asymmetrie der thermischen Linse bewirkt, dass im Inneren des Kristalls
10 ein elliptischer Laserstrahlquerschnitt erzeugt wird, dessen Achsverhältnis von größer 1:1 und kleiner 1:3 an das des Pumpstrahlquerschnittes angepasst ist, ohne dass weitere astigmatische Elemente im Resonator benötigt werden, d.h., ohne dass für die unterschiedlichen Achsen
15 unterschiedliche Strahlformungsmittel eingesetzt werden müssen.

Gegenüberliegend zur Strahleintrittsfläche 5 ist der Laserkristall mit einer, unter einem Brewsterwinkel
20 geschnittenen Endfläche 11 versehen, wodurch das Achsverhältnis noch um den Faktor des Verhältnisses des Brechungsindex des Laserkristalls zum Brechungsindex der Luft vergrößert werden kann. Andererseits weist der innerhalb des Laserkristalls elliptisch ausgebildete
25 Laserstrahlquerschnitt bei seinem Austritt aus dem Kristall einen annähernd runden Querschnitt auf.

Neben der verspiegelten Strahleintrittsfläche 5 enthält der Festkörperlaser-Oszillator einen, den
30 Stabilitätskriterien eines Resonators angepassten Faltungsspiegel 12 sowie einen Auskoppelspiegel 13. In einer ersten Ausführungsform, bei der Impulse mit größerer Pulslänge von mehr als 500 ns erzeugt werden sollen, betragen die beiden, die Pulslänge beeinflussenden

Parameter Resonatorlänge und Auskopplungsgrad 860 mm bzw. 10%. Allgemein sind Resonatorlängen über 500 mm für solche „längeren“ Impulse geeignet.

5 Verringert man den Krümmungsradius des Faltungsspiegels 12, kann die Resonatorlänge verkürzt und damit eine weitere Ausführung eines Festkörperlaser-Oszillators zur Erzeugung kürzerer Impulse (unterhalb 500 ns) aufgebaut werden. Bei einer Resonatorlänge von z. B. 240 mm kann die
10 Durchschnittsleistung des Festkörperlaser-Oszillators bei unveränderter Strahlqualität ($M^2 < 1,1$) von 2,0 W bis 3,2 W variiert werden, was bei Repetitionsraten von 30 kHz zu Pulslängen im Bereich von 30 ns führt.

15 Natürlich kann der Festkörperlaser-Oszillator auch mit Resonatorlängen von weit unterhalb von 180 mm ausgelegt werden, um Pulslängen von weniger als 15 ns zu erreichen.

Zur Impulserzeugung ist zwischen dem Faltungs- und dem
20 Auskoppelspiegel 12, 13 eine Güteschaltung in Form eines akustooptischen Schalters 14 angeordnet.

Die Resonatorkonfiguration ist so gewählt, dass die durch eine Leistungsvariation der Pumpstrahlung ($\Delta P = 2 \text{ W}$)
25 bedingte Änderung der thermischen Linse im Laserkristall zu keiner Veränderung der Strahlqualität ($M^2 \leq 1,1$) führt und zudem der Durchmesser des ausgekoppelten Laserstrahls maximal um 15% geändert wird. Die Oszillatorleistung kann in einem Bereich zwischen 0,8 W - 1,4 W geändert werden,
30 was bei einer Repetitionsrate von 30 kHz zu Impulsdauern von 1900 ns - 360 ns hinter dem Verstärker führt.

Die Repetitionsrate kann über die Ansteuerung des akustooptischen Schalters 14 in einem Bereich von 10 kHz - 200 kHz eingestellt werden.

5 Die Strahlparameter des aus dem Festkörperlaser-Oszillator austretenden Laserstrahls 15 werden durch eine Linsenkombination 16 (Modematching) an einen nachgeordneten Laserverstärker (Fig. 3) angepasst, insbesondere wird der Laserstrahlquerschnitt in einem
10 elliptischen Strahlquerschnitt von geringem Halbachsenverhältnis (1:2 bis 1:3) überführt. Durch die Invarianz der Strahlqualität und der geringen (15%) Änderung des Strahldurchmessers kann sichergestellt werden, dass diese Anpassung bei unterschiedlichen Pump-
15 und Ausgangsleistungen gewährleistet ist. Dies ist Bedingung dafür, um die mit der Leistungsvariation des Festkörperlaser-Oszillators einhergehende Pulslängenvariation des verstärkten Strahls realisieren zu können.

20 Der in Fig. 3 dargestellte Laserverstärker (Ausgangsleistung 50 W), dessen einzelne Verstärkerstufen bereits in der DE 100 43 269 A1 ausführlich beschrieben wurden und auf die hier Bezug genommen wird, besteht aus
25 sechs solcher Verstärkerstufen mit einer seriellen Anordnung von sechs Laserkristallen 17 - 22, die von ebenso vielen jeweils zugeordneten HochleistungsdiodeLasern (in Fig. 3 verdeckt) diodengepumpt sind. Die aus den HochleistungsdiodeLasern
30 austretende Pumpstrahlung wird zunächst kollimiert und anschließend in die Laserkristalle 17 - 22 fokussiert. Aufgrund der hohen Strahlqualität der Pumpstrahlung in der Fast-Axis-Richtung entsteht ein stark elliptischer Pumpfokus mit Abmessungen von etwa 0,1 mm x 2,0 mm, woraus

bei einer absorbierten Pumpleistung von 12 W eine sehr hohe Pumpleistungsdichte und damit eine hohe Kleinsignalverstärkung resultiert. Diese beträgt mehr als 10 pro Verstärkerstufe, so dass sich für die sechs
5 vorgesehenen Verstärkerstufen eine Gesamtkleinsignalverstärkung von größer 10^6 ergibt.

Der aus dem Festkörperlaser-Oszillator austretende runde Laserstrahl 15 durchläuft zur Vermeidung von Rückwirkungen
10 aus dem Laserverstärker in den Festkörperlaser-Oszillator einen Faraday-Isolator 23 und durchstrahlt aufgeweitet durch die Linsenkombination 16 anschließend in einem Zick-Zack-Pfad nacheinander alle sechs Laserkristalle 17 - 22. Zusätzlich wird der Laserstrahl 15 zur weiteren Anpassung
15 an den stark elliptischen Pumpfokus mittels Zylinderlinsen 24, 25 in die Laserkristalle 17 - 22 fokussiert, so dass der in der Tangentialebene kollimierte Laserstrahl 15 die Laserkristalle 17 - 22 in der Sagittalebene mit einem stark elliptischen Fokus durchsetzt. Der vorliegende
20 Laserverstärker ist zweigeteilt, wobei die beiden Teile über ein Periskop 26 optisch verbunden sind.

Nach seinem zweiten Durchtritt durch die Zylinderlinse 29 ist der Laserstrahl auch in der Sagittalebene wieder
25 kollimiert mit dem gleichen elliptischen Querschnitt wie vor dem ersten Durchtritt durch die Zylinderlinse 29.

Somit sind die Laserkristalle 17 - 22 von modenangepassten Strahlen der Pumpstrahlung und der zu verstärkenden
30 Laserstrahlung 15 durchsetzt, wobei sich infolge der eingestrahlten Pumpstrahlung eine thermische Linse mit unterschiedlicher Stärke in zueinander senkrechten Ebenen ausbildet. Die Laserstrahlung 15 ist, in der Ebene mit starker thermischer Linse fokussiert, in jeden der

Laserkristalle 17 - 22 gerichtet, wobei eine sich bildende Strahltaille im Bereich der thermischen Linse liegt.

5 Zur Gewährleistung des Zick-Zack-Pfades dienen Faltspiegel 27 - 32, die auch dazu genutzt werden können, die Strahlabmessungen in der Slow-Axis-Richtung anzupassen. Weitere Umlenkelemente 33 - 37 dienen dem Aufbau einer kompakten Anordnung.

10 Der Laserstrahl 15 wird nach seinem Austritt aus dem Laserverstärker mittels einer nicht dargestellten Linsenanordnung bestehend aus vier Zylinderlinsen und einem Aufweitungsteleskop den gewünschten Strahlparametern für die vorgesehene Anwendung angepasst.

15 Fig. 4 und besonders Fig. 4a, bei der dem gütegeschalteten Oszillatorpuls ein übertrieben dargestellter exponentieller Anstieg der Vorderflanke vorausgeht, verdeutlichen, wie im ns-Bereich die Anstiegsflanke des
20 Laserimpulses am Ausgang des Laserverstärkers der des Oszillatorimpulses zeitlich vorausseilt. Das ist bedingt durch die hohe Kleinsignalverstärkung des Laserverstärkers, wodurch bereits sehr kleine Oszillatorleistungen im μW -Bereich in einer sehr frühen
25 Phase des Impulsaufbaus ausreichen, einen beträchtlichen Teil der Vorderflanke des Verstärkerimpulses zu bilden, so dass der Verstärker bereits frühzeitig - im dargestellten Fall vor Erreichen des Pulsmaximums des Oszillators - stark sättigt und das Pulsmaximum bereits überschritten
30 ist. Der Impuls wird dadurch länger.

Insgesamt resultiert neben dem scheinbaren „Vorauslaufen“ des Verstärkerpulses vor allem aber die erfindungsgemäß

einstellbare Pulsverbreiterung durch die vorgeschlagene Anordnung.

5 Fig. 5 zeigt diese zeitliche Verlängerung der Impulse infolge des Verstärkungsprozesses mit hoher Kleinsignalverstärkung, wobei über einen sehr weiten Bereich die Pumpstrahlungsleistung im Festkörperlaser-Oszillator verändert wird, währenddessen die Pumpstrahlungsleistung im Laserverstärker konstant bleibt.

10

Fig. 6 demonstriert das geringe Maß der Änderung der Ausgangsleistung (10%) am Verstärkerausgang bei einer Variation der Oszillatorleistung aufgrund der Dämpfung des Leistungsabfalls durch die Verstärkung.

15

Patentansprüche

1. Impulslaseranordnung zur Erzeugung von Laserimpulsen mit einstellbarer Impulslänge, bei der ein
5 diodengepumpter, gütegeschalteter Festkörperlaser-Oszillator mit variierbarer Oszillatorleistung zur Bereitstellung von Oszillatorimpulsen vorgesehen ist, dadurch gekennzeichnet, dass dem gütegeschalteten Festkörperlaser-Oszillator ein mehrstufiger
10 Laserverstärker nachgeschaltet ist, bei dem in jeder Stufe ein verstärkendes Medium mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 vorgesehen ist, wobei die durch alle verstärkenden Medien hervorgerufene Gesamtkleinsignalverstärkung mehr als
15 1000 beträgt.
2. Impulslaseranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die modenangepassten Strahlen der Pumpstrahlung und der zu verstärkenden Laserstrahlung
20 (15) in jedem verstärkenden Medium einen Modenquerschnitt aufweisen, der kleiner als $0,5 \text{ mm}^2$ ist.
3. Impulslaseranordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser-Oszillator als
25 aktives Medium einen anisotropen Laserkristall (1) enthält, der von einem asymmetrischen Pumpstrahl (6) gepumpt ist, dessen Pumpstrahlquerschnitt senkrecht zueinander unterschiedliche Ausdehnungen aufweist und
30 der von einem an diese Asymmetrie angepassten Laserstrahlquerschnitt mit einem Achsverhältnis in senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen größer 1:1 und kleiner 1:3 durchsetzt ist.
- 35 4. Impulslaseranordnung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass von den kristallographischen

Achsen des anisotropen Laserkristalls (1) diejenige Achse, in deren Richtung der höchste Wert der Kristallbruchgrenze vorliegt, entlang des größten, in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes gelegten Temperaturgradienten ausgerichtet ist.

5. Impulslaseranordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der anisotrope Laserkristall (1), der einen von dem Pumpstrahl durchsetzten Kristallquerschnitt mit paarweise parallel gegenüberliegenden Kristallkanten (7 - 10) von unterschiedlicher Kantenlänge enthält, seinen größten Wärmeausbreitungskoeffizienten in Richtung der geringeren Ausdehnung des Pumpstrahlquerschnittes und parallel zur Kristallkante (7, 8) mit der geringeren Kantenlänge aufweist.

6. Verfahren zur Impulslängeneinstellung bei Laserimpulsen durch Variation der Leistung eines diodengepumpten, gütegeschalteten Festkörperlaser-Oszillator zur Bereitstellung von Oszillatorimpulsen, dadurch gekennzeichnet, dass die Oszillatorimpulse einem mehrstufigen Laserverstärker zugeführt und in jeder Stufe mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10, mindestens jedoch mit einer Gesamtkleinsignalverstärkung von mehr als 1000 verstärkt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Impulslänge durch eine Änderung der Pumpstrahlungsleistung über den Diodenstrom der Pumpstrahlungsquelle eingestellt wird.

1/4

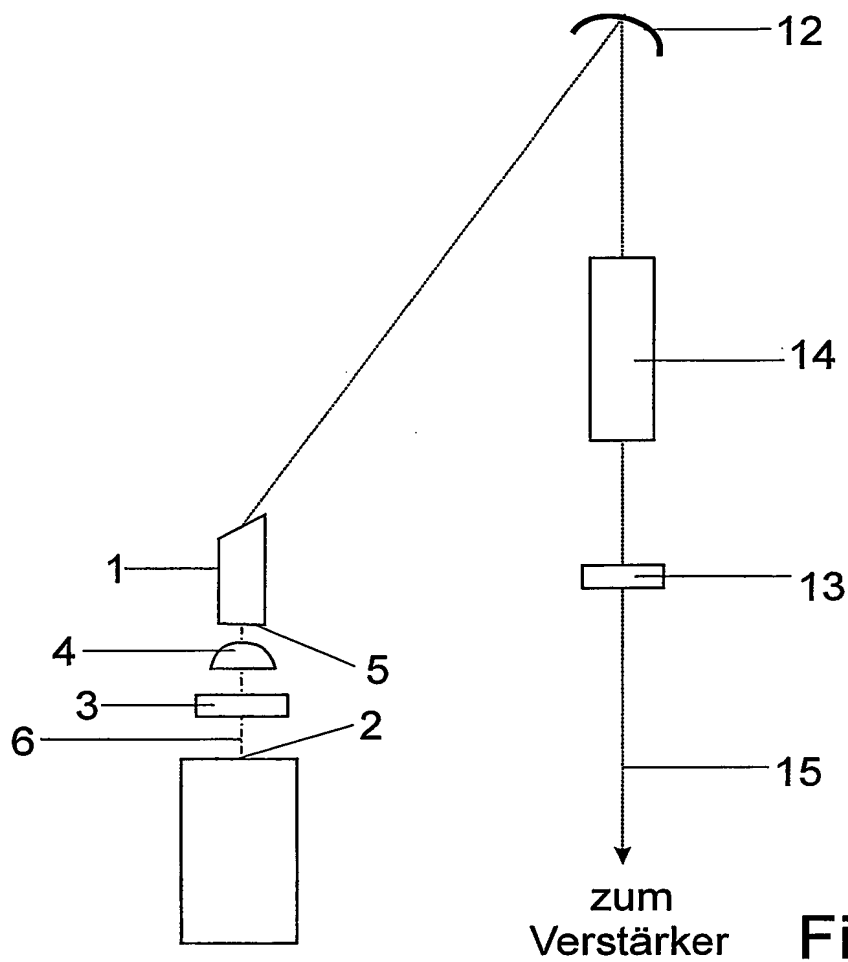


Fig. 1

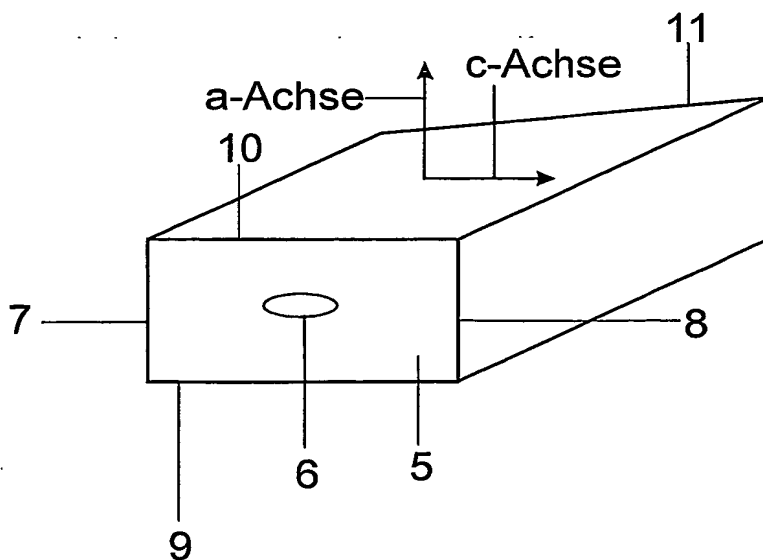


Fig. 2

2/4

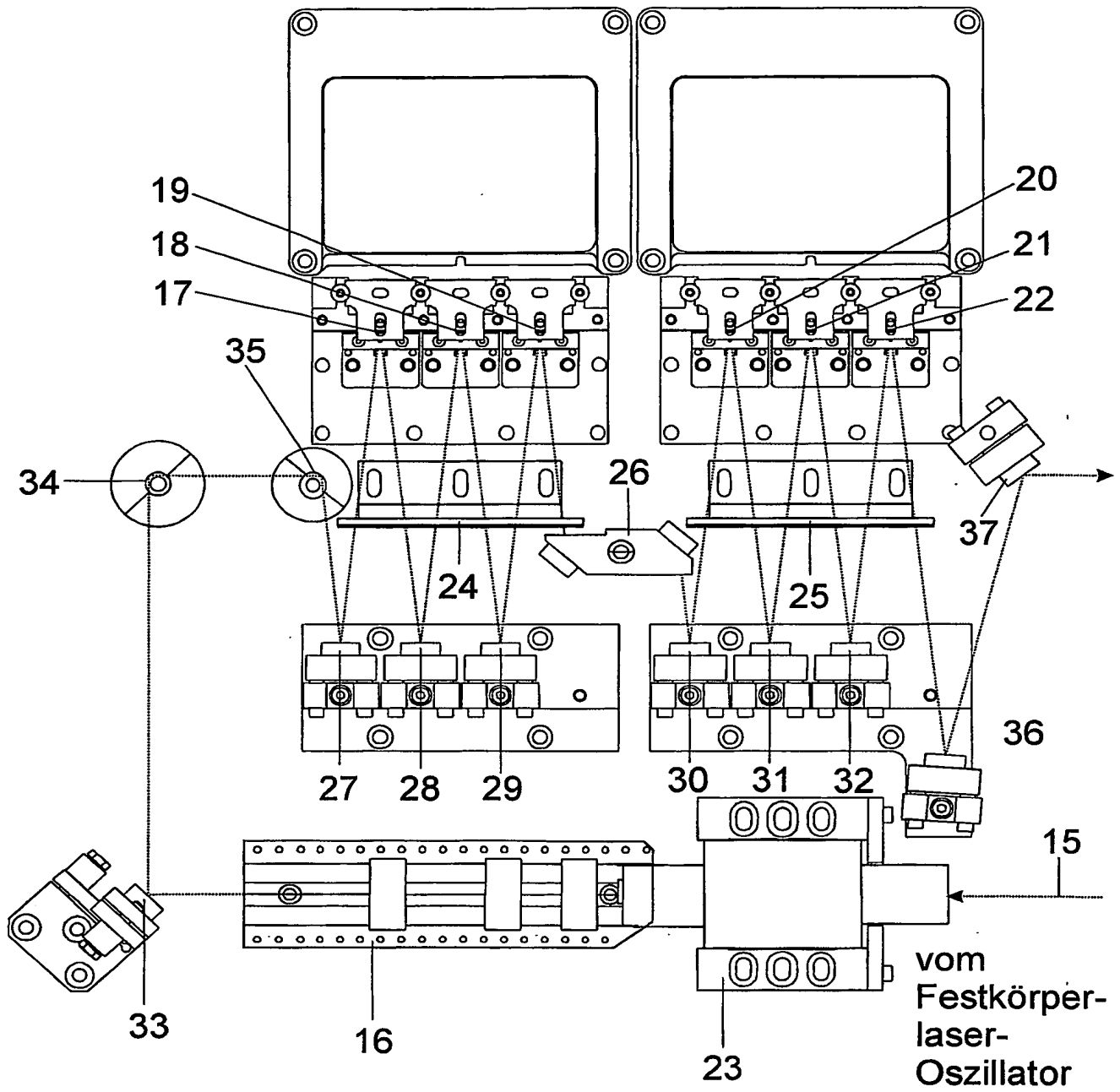


Fig. 3

3/4

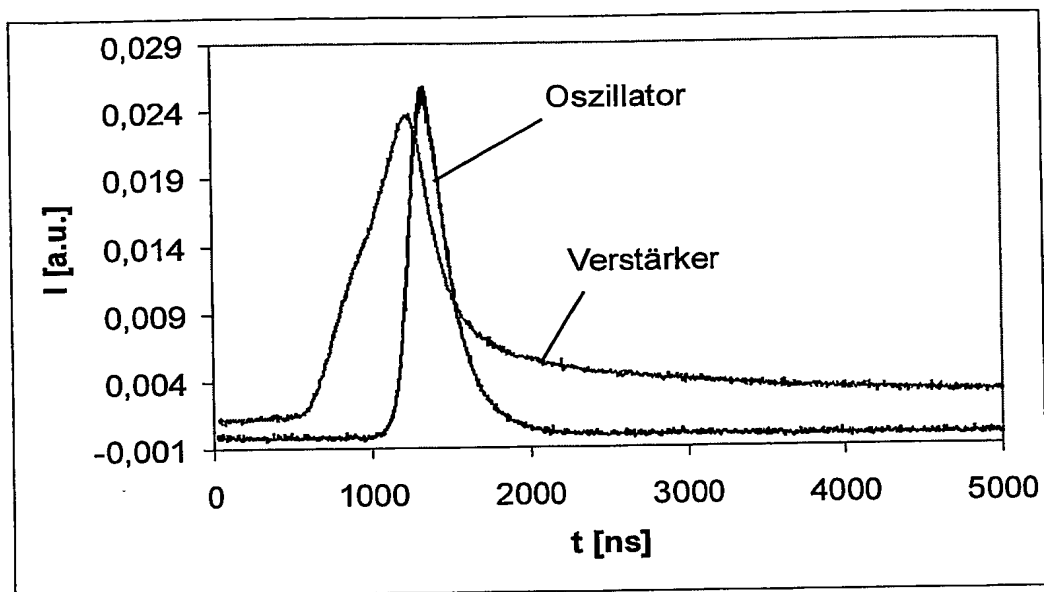


Fig. 4

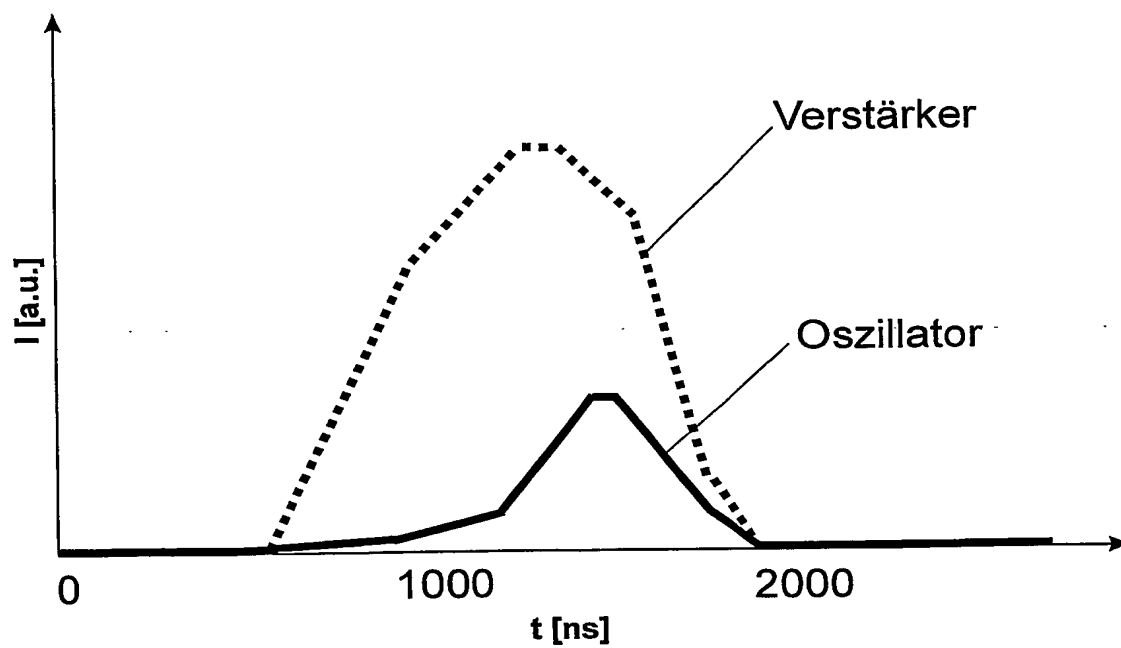


Fig. 4a

4/4

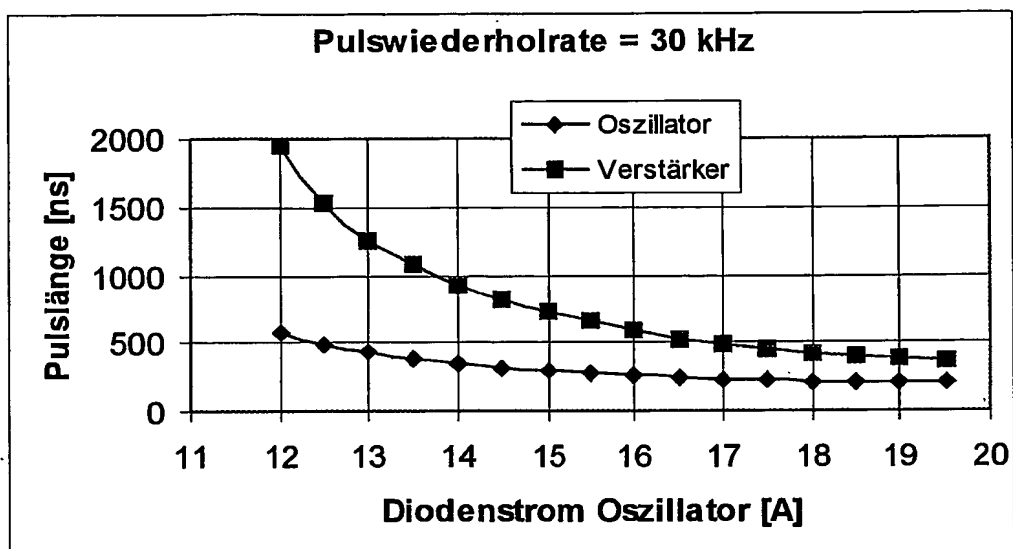


Fig. 5

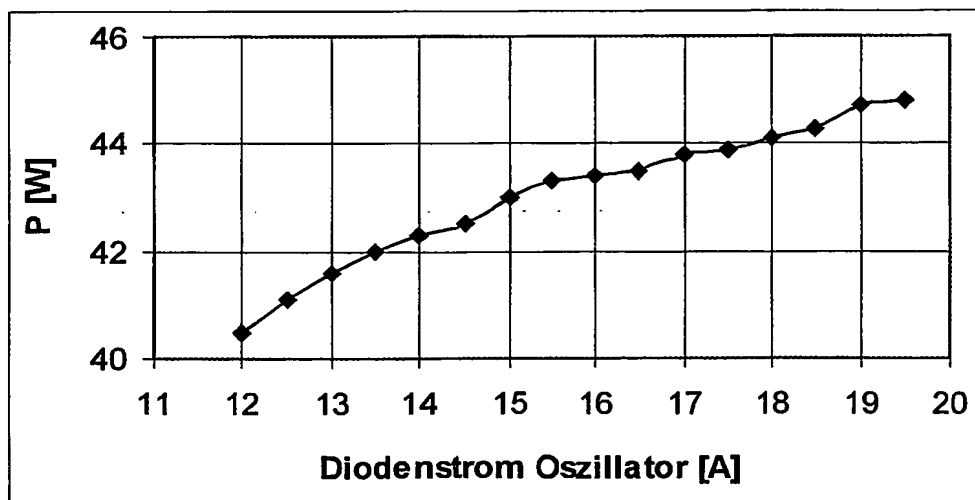


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE 03/02359

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 H01S3/11 H01S3/0941 H01S3/10 H01S3/102

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 100 43 269 A (JENOPTIK JENA GMBH) 4 April 2002 (2002-04-04) cited in the application column 1, line 20-24 column 5, line 29-40; figure 4	1-3, 6, 7
A	GB 1 308 384 A (SANDERS ASSOCIATES INC) 21 February 1973 (1973-02-21) page 2, line 114-118	6, 7
A	US 5 907 570 A (CHENG EMILY ET AL) 25 May 1999 (1999-05-25) column 10, line 12-14	2
A	US 5 867 324 A (NGUYEN HAI-LINH K ET AL) 2 February 1999 (1999-02-02) column 6, line 34-40	3



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *Z* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 November 2003

Date of mailing of the international search report

02/12/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Jobst, B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE 03/02359

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 10043269	A	04-04-2002	DE 10043269 A1	04-04-2002
			CA 2354632 A1	28-02-2002
			FR 2813451 A1	01-03-2002
			GB 2370684 A , B	03-07-2002
			JP 2002141589 A	17-05-2002
			US 2002036821 A1	28-03-2002
GB 1308384	A	21-02-1973	CA 925626 A1	01-05-1973
			CH 512837 A	15-09-1971
			DE 2008835 A1	03-09-1970
			FR 2053087 A6	16-04-1971
			NL 7008225 A	26-01-1971
			SE 368120 B	17-06-1974
			US 3829791 A	13-08-1974
US 5907570	A	25-05-1999	DE 69811929 D1	10-04-2003
			EP 1326312 A2	09-07-2003
			EP 1025624 A2	09-08-2000
			JP 2001521290 T	06-11-2001
			WO 9921250 A2	29-04-1999
US 5867324	A	02-02-1999	NONE	

INTERNATIONALER RESEARCHENBERICHT

Internat. Aktenzeichen

PCT/DE 03/02359

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 H01S3/11 H01S3/0941 H01S3/10 H01S3/102

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 H01S

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DE 100 43 269 A (JENOPTIK JENA GMBH) 4. April 2002 (2002-04-04) in der Anmeldung erwähnt Spalte 1, Zeile 20-24 Spalte 5, Zeile 29-40; Abbildung 4	1-3, 6, 7
A	GB 1 308 384 A (SANDERS ASSOCIATES INC) 21. Februar 1973 (1973-02-21) Seite 2, Zeile 114-118	6, 7
A	US 5 907 570 A (CHENG EMILY ET AL) 25. Mai 1999 (1999-05-25) Spalte 10, Zeile 12-14	2
A	US 5 867 324 A (NGUYEN HAI-LINH K ET AL) 2. Februar 1999 (1999-02-02) Spalte 6, Zeile 34-40	3

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

Z Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

14. November 2003

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

02/12/2003

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Jobst, B

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die derselben Patentfamilie gehören

Internationaler Aktenzeichen

PCT/DE 03/02359

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 10043269	A	04-04-2002	DE 10043269 A1	04-04-2002
			CA 2354632 A1	28-02-2002
			FR 2813451 A1	01-03-2002
			GB 2370684 A , B	03-07-2002
			JP 2002141589 A	17-05-2002
			US 2002036821 A1	28-03-2002
GB 1308384	A	21-02-1973	CA 925626 A1	01-05-1973
			CH 512837 A	15-09-1971
			DE 2008835 A1	03-09-1970
			FR 2053087 A6	16-04-1971
			NL 7008225 A	26-01-1971
			SE 368120 B	17-06-1974
			US 3829791 A	13-08-1974
US 5907570	A	25-05-1999	DE 69811929 D1	10-04-2003
			EP 1326312 A2	09-07-2003
			EP 1025624 A2	09-08-2000
			JP 2001521290 T	06-11-2001
			WO 9921250 A2	29-04-1999
US 5867324	A	02-02-1999	KEINE	